

Impacto da Geração Distribuída por Fonte Fotovoltaica em uma Rede de Distribuição e seu Sistema de Proteção de Sobrecorrente

Claudio P. S. Filho*, Valdomiro F. L. Junior*, Denis K. Alves*, Camila S. Gehrke**, Marcel A. Araújo*

*Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA), Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) Cabo de Santo Agostinho, PE, (e-mail: claudio.paz@ufrpe.br, valdomiro.lima@ufrpe.br, denis.keuton@ufrpe.br, marcel.araujo@ufrpe.br)

** Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, PB (e-mail: camila@cear.ufpb.br)

Abstract: The different peculiarities of distribution systems added to the variability of generation and integration by sources of distributed generation, bring with them challenges for the adaptation of the entire network and, mainly, for its protection systems. In this context, this work analyzes the impacts caused to the protection system of a distribution network after the integration of distributed generation by photovoltaic solar source against different test scenarios for the insertion of distributed generation and the occurrence of faults. The results demonstrate the influence of the variability of the integration of distributed generation on the voltage profile of the distribution system and on the protection actuation depending on the location of the generation source, the fault location and positioning of the relays. reverse fault and consequently non-compliance with the basic requirements of the protection system.

Resumo: As diferentes peculiaridades dos sistemas de distribuição somadas à variabilidade de geração e integração por fontes de geração distribuída, trazem consigo desafios para a adaptação de toda a rede e, principalmente, para seus sistemas de proteção. Nesse contexto, este trabalho analisa os impactos causados ao sistema de proteção de uma rede de distribuição após a integração da geração distribuída por fonte solar fotovoltaica frente a diferentes cenários de teste para inserção de geração distribuída e a ocorrência de faltas. Os resultados demonstram a influência da variabilidade de integração de geração distribuída no perfil de tensão do sistema de distribuição e na atuação da proteção a depender da localização da fonte geração, do local da falta e posicionamento dos relés, podendo ocorrer a atuação dos mesmos para uma falta reversa e consequentemente o descumprimento de requisitos básicos do sistema de proteção.

Keywords: distributed generation, solar photovoltaic generation, protection of electrical systems, overcurrent relay, distribution systems.

Palavras-chaves: geração distribuída, geração solar fotovoltaica, proteção de sistemas elétricos, relé de sobrecorrente, sistemas de distribuição.

1. INTRODUÇÃO

O constante crescimento da demanda por energia elétrica no mundo traz grandes desafios ao tradicional Sistema Elétrico de Potência (SEP), em que a geração da energia elétrica é realizada distante dos grandes centros de consumo. Nesse sentido, é cada vez mais necessária a geração de energia próxima aos centros de carga e o uso de fontes de mais limpas como as energia renováveis, aumento a geração e promovendo o menor impacto possível ao meio ambiente Hashmi; Hanninen; Maiki, 2011), (Joseph; Balachandra, 2020), (Shang; Ding; Cui, 2021).

A geração de energia mais próximas das cargas é denominada de Geração Distribuída (GD), a qual de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) caracteriza-se por centrais geradoras de energia elétrica de qualquer potência com instalações conectadas diretamente no sistema de distribuição ou em instalações de consumidores, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despachada (ANEEL, 2016).

As redes de distribuição tradicionais possuem uma configuração radial cuja geração de energia é centralizada com fluxo de potência unidirecional. No entanto, essa topologia vem mudando nos últimos anos devido à integração de GD, fato que também vem acompanhado pelo surgimento das microrredes, as quais são redes de distribuição que podem operar isoladamente do sistema elétrico e são atendidas diretamente por uma unidade de GD (Madruga et al., 2018), (Singh; Sharma, 2017), (Muhtadi et al., 2021).

Nesta conjuntura, em meio à busca contínua por tecnologias para melhorar os processos de geração, transmissão e distribuição de energia, assim como garantir o fornecimento de energia de melhor qualidade para os consumidores, a integração de recursos energéticos distribuídos e de ferramentas para monitoramento, comunicação e gerenciamento da rede trazidas pelas redes elétricas inteligentes têm promovido a modernização dos SEPs (Hashmi; Hanninen; Maiki, 2011), (Chawda et al., 2020) (Joseph; Balachandra, 2020). Como vantagens essas novas tecnologias promovem maior eficiência energética,

modicidade tarifária, aumento do uso de fontes renováveis, redução de perdas, melhorias no monitoramento da rede e aumento da qualidade, confiabilidade e continuidade no fornecimento de energia (Kakran, Chanana, 2018), (Mehigan et al., 2018), (Bollen et al., 2010) e (Bayindir et al., 2016). Por outro lado, os principais desafios resultantes da integração da GD com a rede de distribuição requerem sua adequação e modernização, devido sobretudo a: fluxo de potência bidirecional, perda de radialidade, problemas de coordenação e seletividade, aumento dos níveis operacionais de tensão, curto-circuito, flutuações de tensão, harmônicas, ocorrência de ilhamento não intencional, entre outros (Madruga et al., 2018), (Singh; Sharma, 2017). Diante dessa problemática, visando a aplicação dessas novas tecnologias e evolução dos SEPs, faz-se necessário pesquisas que garantam a adequação da rede devido a integração de GDs, como ajustes dos sistemas de proteção e atendimento dos indicadores pelas concessionárias frente às normas regulatórias (Nsaif et al., 2021).

Neste contexto, Song et al., (2017) propuseram um novo método de proteção adaptativa para rede de distribuição com integração de GDs, o qual utilizava análises na topologia da rede para correções de valores de atuação dos dispositivos de proteção (principal ou de retaguarda). O método proposto executa uma transformação equivalente na rede localizada a montante da proteção e elimina a influência da GD em cada corrente de ramificação de acordo com a matriz do fator de contribuição. Os resultados mostraram que o esquema de proteção adaptativa proposto possui boa eficiência, independente do tipo de falta, podendo ser simétrica ou assimétrica. Como desvantagem, o método não aborda o impacto causado devido a impedância da falta e variabilidade de cenários de operação.

Nascimento, Brito e Souza (2018) também apresentaram um método de proteção adaptativa para redes de distribuição com GDs. No entanto, os autores utilizaram um algoritmo que modifica os ajustes dos relés com base no estado de operação dos disjuntores associados às GDs. O método executa um algoritmo que é dividido em duas partes, a primeira é *offline*, em que se tem a análise do cenário de operação da rede com objetivo de detectar alguma mudança. A segunda parte é feita de forma *online*, visto que se tem o monitoramento da rede objetivando-se a detecção de mudança da sua topologia. A avaliação do método foi realizada por meio de 120 cenários de operação simulados. O algoritmo proposto apresentou bons resultados, sendo mais assertivo e rápido quando comparado com o sistema de proteção convencional. Uma das limitações do método proposto é que não houve um aprofundamento em relação a cálculos matemáticos, além de não ser destacada a composição da rede em relação a valores de cargas e suas respectivas localização.

Suriya Priya e Geethanjali (2018) desenvolveram um método de proteção para ajuste das configurações de disparo de relés visando garantir a coordenação da proteção entre o sistema de energia convencional e o sistema com GD eólica. O sistema de energia interconectado é considerado em condição normal e de falta (fase-fase), e a zona com falta é detectada com base no método de cálculo de impedância de falta. Os resultados da simulação são analisados e verifica-se que o comprimento da linha de transmissão e a potência da GD não afetam as características do relé.

Tendo em vista a conjuntura atual com demanda crescente por integração de recursos energéticos distribuídos, notadamente GD, e as pesquisas correlatas da literatura, o presente trabalho desenvolve uma análise do impacto da GD no sistema de proteção de uma rede de distribuição por meio da aplicação de faltas em diferentes pontos da rede e conexão/desconexão de geradores distribuídos. Para análise e modelagem foi considerado o sistema de proteção convencional de sobrecorrente e geração distribuída por fonte solar fotovoltaica, ambas implementadas no alimentador teste de 13 barras do IEEE usando o *software* Matlab/Simulink®. Além disso, propõe-se nesse artigo um detalhamento das modelagens dos subsistemas do módulo fotovoltaico e do relé de sobrecorrente. Como diferencial, o modelo implementado para o relé tem como forma de coordenação o fio piloto, o que permite a comunicação direta entre os relés, tornando o sistema de proteção seletivo e, quando comparado aos relés temporizados, mais rápido para atuar contra as faltas (Filho, Mamede, 2011).

O artigo está organizado da seguinte forma: a segunda seção apresenta os detalhes sobre a implementação computacional do módulo fotovoltaico e o relé de sobrecorrente. Na terceira seção é evidenciada a metodologia para a definição dos cenários de análise e simulações. Na quarta seção são mostrados os resultados referentes a resposta de tensão e corrente frente à ocorrência de falta, integração de GD e atuação dos relés. As conclusões da pesquisa são apresentadas na quinta seção.

2. MODELOS DESENVOLVIDOS E IMPLEMENTADOS

Nesta seção serão apresentados os modelos desenvolvidos para a modelagem dos módulos fotovoltaicos assim como o modelo do relé de sobrecorrente.

1.1 Módulo Fotovoltaico

Com base na pesquisa apresentada em Yadav e Sambariya (2018) em que se apresenta o detalhamento do modelo real de uma célula fotovoltaica, no presente trabalho é proposto um modelo computacional de um módulo fotovoltaico por meio do qual é possível obter diferentes configurações de associação em série e paralelo dos módulos. O modelo é baseado em um circuito elétrico que representa o comportamento real dos módulos fotovoltaicos e os parâmetros de entrada são três: a irradiância (G), a temperatura (T) e a tensão (V), e como saída um sinal que será utilizado como referência para uma fonte de corrente controlada, conforme ilustrado na Fig. 1. Além disso, o modelo inclui a influência do sombreamento das placas, bem como perdas de correntes de fuga e por contatos elétricos do painel.

O modelo apresentado na Fig. 1 pode ser expressado por meio das seguintes equações:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh}, \quad (1)$$

$$I_{ph} = N_p \times [I_{sc} + k_i \times (T - T_n)] \times \left(\frac{G}{G_n}\right), \quad (2)$$

$$I_{sh} = (V + I \times R_s) / R_{sh}, \quad (3)$$

$$I_d = N_p \times I_0 \left[\exp\left(\frac{q \times (V + I \times R_s) / N_p}{n \times K \times T \times N_s}\right) - 1 \right], \quad (4)$$

$$I_0 = I_{rs} \times \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 \times \exp \left\{ N_{cell} \times \left[\frac{q \times E_{go} \times \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)}{n \times K} \right] \right\}, \quad (5)$$

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}/N_p}{\exp\left(\frac{q \times V_{oc}}{n \times N_s \times K \times T}\right) - 1}. \quad (6)$$

Em que I_{sc} é a corrente de curto-circuito, k_i é a corrente de curto-circuito a 25 °C e 1.000 W/m²; T é a temperatura de operação; T_n é a temperatura de referência; G é a irradiância de operação; G_n representa a irradiância de referência; N_p é o número de células em paralelo; V é a tensão de saída; R_s é a resistência em série; R_{sh} é a resistência shunt; N_s é o número de células em série; q é a carga do elétron; n é o fator de idealidade do diodo; K é a constante de Boltzman; E_{go} é a energia da banda do semiconductor; N_{cell} é o número de células no total; V_{oc} é a tensão de circuito aberto (obtida com o terminal de saída da célula fotovoltaica em aberto).

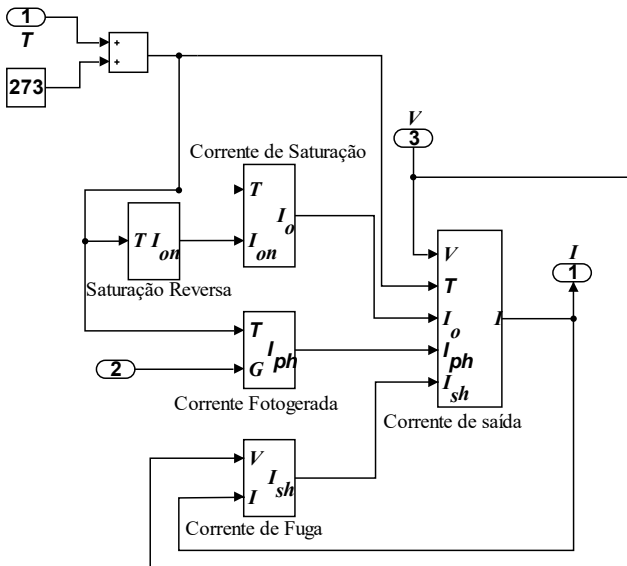


Fig. 1. Modelo numérico do módulo fotovoltaico implementado.

1.2 Relé de sobrecorrente

Em relação ao sistema de proteção, a modelagem do relé de sobrecorrente baseou-se no estudo apresentado em Maji e Ghosh (2017), e o presente modelo utiliza como entradas os valores das correntes fornecidos por um medidor trifásico (representados por In1, In 2 e In 3) para se ter uma comparação com a corrente de *pick-up* a partir de um bloco com operador relacional, e como diferencial, a coordenação por fio piloto.

A Fig. 2 ilustra a lógica de funcionamento dos relés, por meio da qual os operadores relacionais são responsáveis pela comparação dos valores das correntes em cada fase com o valor de limiar de acionamento do relé (*pick-up*). Os *flip-flops* têm como função o travamento do sinal, caso seja detectada uma falta pelo relé. O operador lógico AND irá receber um sinal de nível lógico baixo em caso de falta na rede, gerando na sua saída um outro sinal de nível lógico baixo.

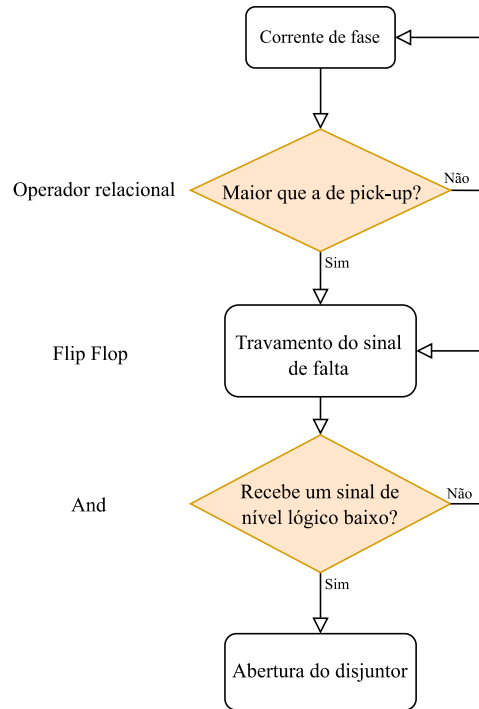


Fig. 2: Algoritmo para o funcionamento do relé de sobrecorrente.

A Tabela 1 representa o operador lógico *and*, responsável pelo envio do sinal de *trip* para o disjuntor trifásico.

Tabela 1. Tabela-verdade do flip-flop.

S	R	Q _n	!Q _n
0	0	Q _{n-1}	!Q _{n-1}
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	0	0

A Fig. 3 representa o circuito lógico do relé implementado, no qual é composto por 3 componentes: o operador relacional para os sinais de entrada; o *flip-flop* e o circuito lógico implementado dentro do relé de sobrecorrente.

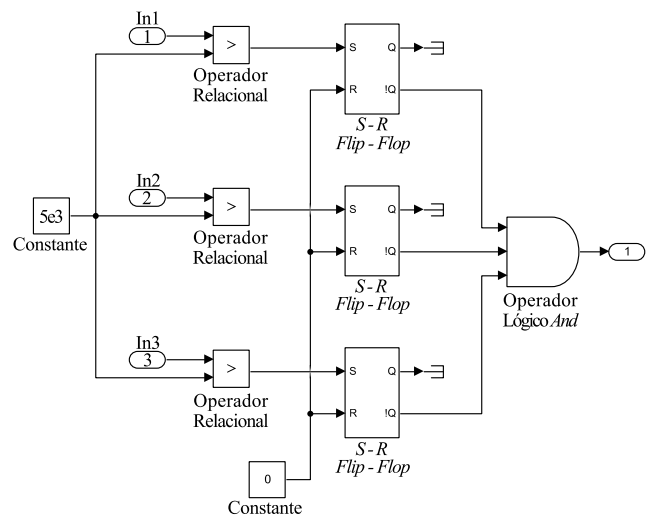


Fig. 3: Circuito lógico implementado dentro do relé.

3. PERFORMANCE E AVALIAÇÃO

Objetivando realizar simulações para avaliação do comportamento e verificação de parâmetros de uma rede de distribuição após a integração de GD e atuação do sistema de proteção de sobrecorrente, foi modelado no ambiente Matlab/Simulink o alimentador teste de 13 barras do IEEE (Kersting, 2001; IEEE, 2020) conforme ilustrado na Fig. 4. Ressalta-se que para a presente pesquisa o regulador de tensão não foi modelado, uma vez que se pretende analisar os efeitos da inserção de fontes de GD sem a influência da melhora do perfil de tensão exercida pelo regulador. Para efeito de análise, assumiu-se que o dispositivo de desconexão da linha entre os nós 671 e 692 estivesse sempre fechado. Além disso, todos os resultados referentes a tensão são apresentados em pu tendo como base a tensão de saída da subestação, cujo valor é 4,16 kV, assim como os resultados relativos à carga 634, cujo valor base é 480 V. Ademais, os resultados obtidos em relação a tensão, são observados de acordo com a norma da PRODIST Módulo 8 (ANEEL, 2021), dado que se exige que os valores obtidos estejam entre os limites de 0,95 a 1,05 pu.

Com relação a análise das correntes dos relés de sobrecorrente, bem como atuação, coordenação e seletividade com e sem a presença de GD no sistema, foram alocados 2 relés, respectivamente entre as barras 650 e 632, e 632 e 671, como apresentado na Fig. 4, a qual ilustra a topologia do sistema modelado. Com o sistema teste nessa configuração foram feitas simulações para análise dos dados de tensão em todo sistema frente a integração de GDs (com a mesma potência da carga em que será alocada) e ocorrência de faltas monofásicas e trifásicas à terra em diferentes barras, e em relação ao que deve ser atendido por norma, bem como avaliação da atuação dos relés, compondo os 5 diferentes cenários abaixo:

Cenário 1: sistema nas condições iniciais do modelo com a presença dos relés, sem integração de GD e sem a ocorrência de falta;

Cenário 2: sistema com a presença dos relés, sem integração de GD e com a ocorrência de uma falta trifásica à terra na barra 675;

Cenário 3: sistema com a presença dos relés, com integração de GD na barra 675 (potência de 850 kW) e sem a ocorrência de falta;

Cenário 4: sistema com a presença dos relés, com integração de GD na barra 675 (potência de 850 kW) e na barra 652 (potência de 130 kW), e sem a ocorrência de falta;

Cenário 5: sistema com a presença dos relés, com integração de GD na barra 675 (potência de 850 kW) e com a ocorrência de uma falta trifásica à terra é aplicada no tempo de 0,1s de simulação na barra 632.

Cenário 6: sistema com a presença dos relés, sem integração de GD e com a ocorrência de uma falta monofásica (fase “A” à terra) na barra 675;

Cenário 7: sistema com a presença dos relés, com integração de GD na barra 675 (potência de 850 kW) e com a ocorrência de uma falta monofásica (fase “A” à terra) é aplicada no tempo de 0,1s de simulação na barra 652.

3.1 Cenário 1

Com o sistema nas condições iniciais do modelo em regime permanente, presença dos relés, sem integração de GD e sem a ocorrência de falta, conforme Fig. 4, os resultados obtidos em relação a tensão são sumarizada na Tabela 2. De acordo com a Tabela 2 existem alguns pontos da rede, no qual o valor da tensão está abaixo da recomendada pela norma presente no módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2021), indicando a necessidade de melhoria do perfil de tensão com a integração de GD.

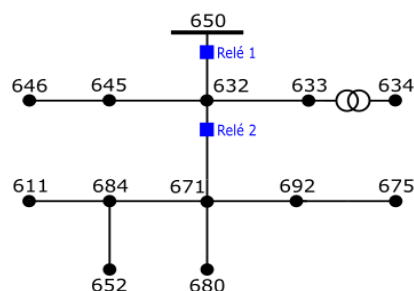


Fig. 4: Alimentador teste de 13 barras do IEEE com relés de sobrecorrente.

Tabela 2. Tensão em regime permanente.

Barra	Tensão - Fase A [pu]	Tensão - Fase B [pu]	Tensão - Fase C [pu]
611	0,9335	0,9945	0,9146
632	0,9604	0,9923	0,9515
633	0,9573	0,9903	0,9489
634	0,9573	0,9903	0,9489
645	0,9596	0,9887	0,9473
646	0,9665	0,9679	0,9582
652	0,9317	0,9941	0,9150
671	0,9348	0,9945	0,9166
675	0,9290	0,9966	0,9149
680	0,9348	0,9945	0,9166
692	0,9348	0,9945	0,9166

A Tabela 3 sumariza o valor RMS das correntes vista pelos relés, enquanto a Fig. 5 e a Fig. 6 ilustram os registros oscilográficos das correntes dos Relés 1 e 2, respectivamente.

Tabela 3. Corrente vista pelos relés em regime permanente.

Medidores	Corrente - Fase A [A]	Corrente - Fase B [A]	Corrente - Fase C [A]
Relé 1	798,276	578,753	734,631
Relé 2	593,657	378,203	520,796

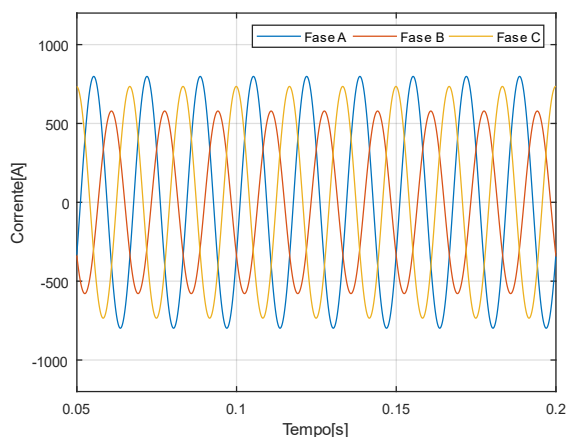


Fig. 5: Registro Oscilográfico da Corrente (Relé 1) em regime permanente.

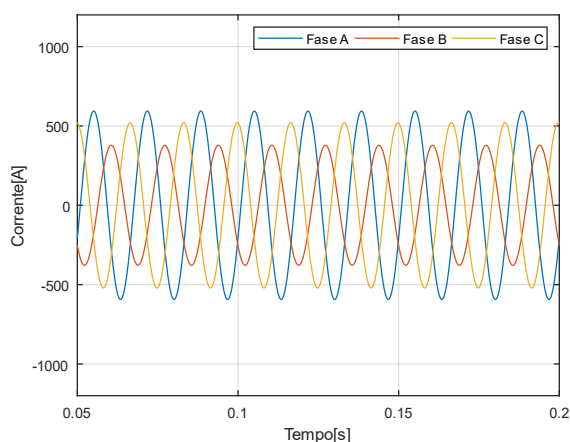


Fig. 6: Registro Oscilográfico da Corrente (Relé 2) em regime permanente.

3.2 Cenário 2

Nesse cenário é aplicada uma falta trifásica à terra na barra 675 e sem considerar a integração da GD. A Fig. 7 e a Fig. 8 apresentam o comportamento dos relés 1 e 2 após aplicação da falta trifásica. Em $t = 0,1$ s nota-se a atuação do Relé 2 isolando parte do alimentador sob falta, o que impacta diretamente a tensão dos nós remanescentes do sistema.

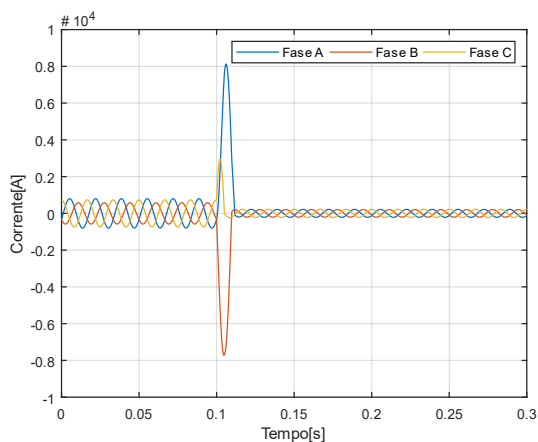


Fig. 7: Registro Oscilográfico da Corrente (Relé 1) após uma falta aplicada em 675.

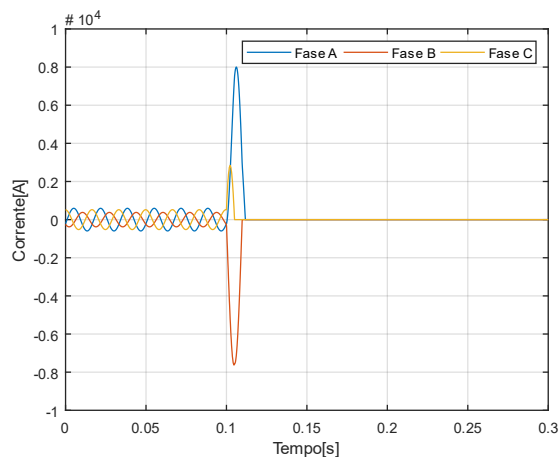


Fig. 8: Registro Oscilográfico da Corrente (Relé 2) após uma falta aplicada em 675.

Os resultados obtidos em relação a tensão em regime permanente após a ocorrência da falta são apresentados na Tabela 4. De acordo com a Tabela 4, observa-se uma elevação de tensão nos nós 632, 633, 634 e 645, visto que com a diminuição da corrente de saída da subestação, tem-se uma menor queda de tensão no decorrer da linha de distribuição, elevando a tensão para valores que estão dentro dos limites requisitados por norma.

Tabela 4. Tensão em cada barramento após falta em 675.

Barramento	Tensão - Fase A [pu]	Tensão - Fase B [pu]	Tensão - Fase C [pu]
611	0,0000	0,0000	0,0000
632	0,9881	0,9909	0,9862
633	0,9850	0,9890	0,9835
634	0,9850	0,9890	0,9835
645	0,9873	0,9873	0,9819
646	0,9862	0,9837	0,9837
652	0,0000	0,0000	0,0000
671	0,0000	0,0000	0,0000
675	0,0000	0,0000	0,0000
680	0,0000	0,0000	0,0000
692	0,0000	0,0000	0,0000

3.3 Cenário 3

Nesse cenário é analisado a tensão em regime permanente após a inserção da geração distribuída na barra 675 com potência de 850 kW, baseado na Tabela 5 tem-se uma elevação de tensão quando comparado ao comportamento do sistema inicialmente modelado deixando-a entre os valores permitidos por norma (0,95 a 1,05 pu). Sendo assim, percebe-se que, a depender da potência instalada, a geração distribuída pode beneficiar a concessionária no atendimento dos melhores indicadores de qualidade de energia, porém em excesso pode ocasionar sobretensão no sistema, como já discutido neste trabalho.

Tabela 5. Tensão em cada barramento após inserção da GD em 675.

Barramento	Tensão - Fase A [pu]	Tensão - Fase B [pu]	Tensão - Fase C [pu]
611	0,9680	1,0379	0,9509
632	0,9767	1,0121	0,9656
633	0,9735	1,0100	0,9629
634	0,9735	1,0100	0,9629
645	0,9759	1,0083	0,9614
646	0,9695	0,9710	0,9607
652	0,9646	1,0370	0,9458
671	0,9666	1,0375	0,9464
675	0,9684	1,0444	0,9508
680	0,9666	1,0375	0,9464
692	0,9666	1,0375	0,9464

3.4 Cenário 4

O cenário 4 é composto pela integração da GD na barra 675 (potência de 850 kW) e na barra 652 (potência de 130 kW) tem-se o perfil de tensão em cada barra do sistema conforme resultados da Tabela 6 em que é percebida uma sobretensão na fase B de alguns pontos da rede. Contudo, este resultado confirma o estudo feito até o momento, dado que, a depender da potência instalada das gerações distribuídas, tem-se a elevação da tensão em alguns locais do sistema a ponto de ultrapassar os limites estabelecidos por norma, além de impactar diretamente em alguns equipamentos do sistema, assim podendo danificá-los.

Tabela 6. Tensão em cada barramento após inserção da GD em 675 e 652.

Barramento	Tensão - Fase A [pu]	Tensão - Fase B [pu]	Tensão - Fase C [pu]
611	1,0051	1,0709	1,0063
632	0,9923	1,0194	0,9903
633	0,9889	1,0173	0,9874
634	0,9889	1,0173	0,9874
645	0,9915	1,0157	0,9860
646	0,9860	0,9809	0,9715
652	1,0004	1,0665	1,0034
671	1,0013	1,0633	1,0035
675	1,0017	1,0706	1,0105
680	1,0013	1,0633	1,0035
692	1,0013	1,0633	1,0035

3.5 Cenário 5

No presente cenário, tem-se a integração da GD na barra 675 (potência de 850 kW) com a ocorrência de uma falta trifásica à terra aplicada no instante de tempo de 0,1 s de simulação na barra 632, e é monitorado o comportamento dos relés durante a falta, sendo esse demonstrado na Fig. 9 e na Fig. 10. Ambos os dispositivos de proteção atuaram com a presença da GD em 675 com uma falta aplicada em 632 e diante disso tem-se o rompimento de alguns requisitos básicos da proteção, a confiabilidade e a zona de atuação, visto que o Relé 2 atua para uma falta reversa a ele devido a presença da geração distribuída, algo não desejado nos sistemas de proteção.

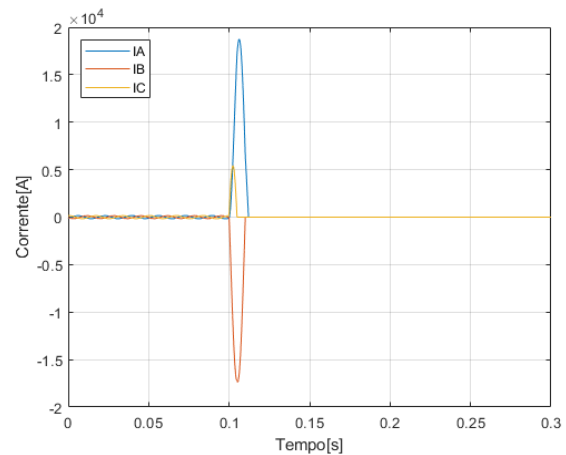


Fig. 9: Registro Oscilográfico da Corrente (Relé 1).

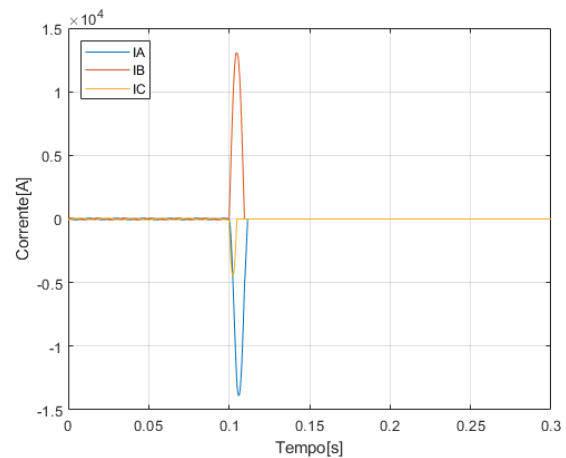


Fig. 10: Registro Oscilográfico da Corrente (Relé 2).

Além disso, como ilustrado na Fig. 11, quando analisada a corrente no ponto de falta, fica evidente a isolamento do curto-circuito em relação às fontes de alimentação (subestação e geração distribuída). Contudo, como já citado, isso se deve a atuação de forma não desejável do Relé 2, visto que a partir da inserção da GD tem-se a mudança do fluxo de potência, tornando-o bidirecional e fazendo com que o relé atue para uma falta reversa a ele.

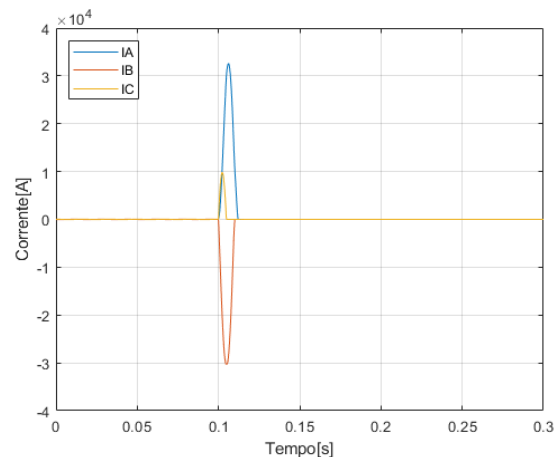


Fig. 11: Registro Oscilográfico da Corrente no ponto 632.

3.6 Cenário 6

Na presente análise, aborda-se um cenário em que se tem uma falta monofásica à terra no barramento 675 sem a presença de GD na rede. Dessa forma, como apresentado na Fig. 12 e na Fig. 13 tem-se a atuação dos relés de forma semelhante aos resultados obtidos no cenário 2 do presente trabalho, dado que se tem atuação do Relé 2 de forma a isolar o trecho da rede submetido à falta, obedecendo o critério de seletividade e ratificando a confiabilidade do sistema de proteção modelado.

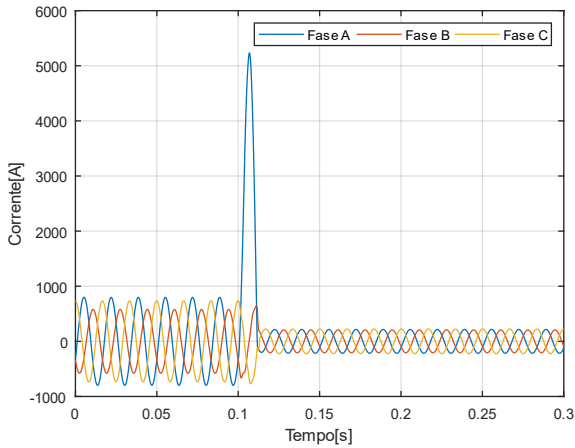


Fig. 12: Registro Oscilográfico da Corrente (Relé 1).

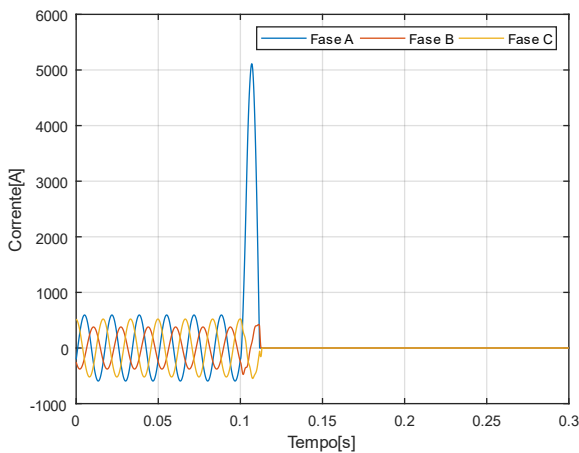


Fig. 13: Registro Oscilográfico da Corrente (Relé 2).

3.7 Cenário 7

O último cenário é composto pela integração da GD na barra 675 (potência de 850 kW) com a ocorrência de uma falta monofásica à terra aplicada no instante de tempo de 0,1 s de simulação na barra 652, dado que se objetiva analisar o impacto causado na rede após a ocorrência da falta em um mesmo ramo da GD sem a presença de um equipamento protetivo do ponto de vista do sistema. Em relação ao comportamento dos relés, a Fig. 14 e a Fig 15 ilustram o que já era aguardado do ponto de vista do sistema, em que se tem atuação do Relé 2 isolando o trecho sob falta.

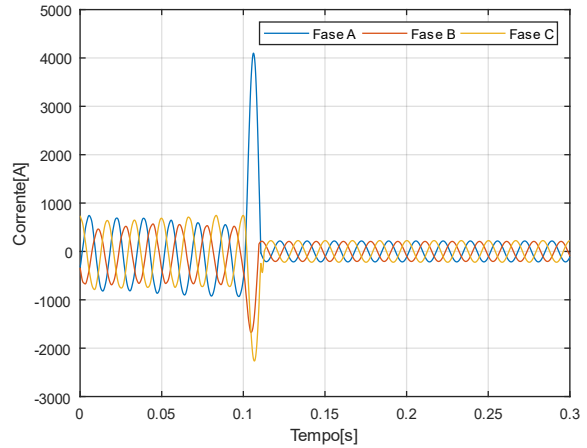


Fig. 14: Registro Oscilográfico da Corrente (Relé 1).

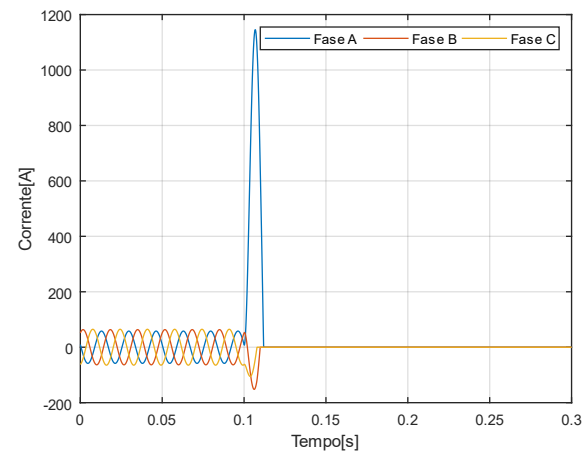


Fig. 15: Registro Oscilográfico da Corrente (Relé 2).

Contudo, quando analisado o oscilográfico da corrente no ponto de falta (barramento 652), conforme Fig. 16, observa-se a consequência da alimentação do curto-circuito pela GD, sendo este um dos impactos negativos causados pela ocorrência de falta em um sistema com proteção inadequada para integração de GD.

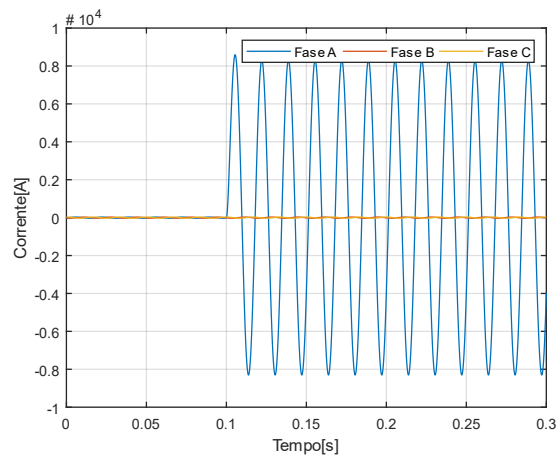


Fig. 16: Registro Oscilográfico da Corrente no ponto de falta (652).

4. CONCLUSÃO

A correta atuação dos sistemas de proteção diante de faltas em redes de distribuição de energia elétrica é por si mesmo um grande desafio técnico. No entanto, quando conectada uma GD em um alimentador na rede de distribuição, o impacto no sistema de proteção torna-se ainda mais relevante dependendo da localização do ponto de conexão, da potência de geração a ser injetada e alteração dos níveis de curto-circuito.

Neste contexto, o presente artigo trouxe, com base em modelagens e simulações, cenários em que são avaliados os impactos para indicadores do SEP frente a integração de GD's e da ocorrência de faltas aplicadas em pontos diferentes do sistema, ocasionando sobretensão na rede, atuação inadequada da proteção, e alimentação de curto-circuito por parte da GD.

Verificou-se a relação direta entre a melhora do perfil de tensão do sistema de distribuição e a integração de GD, desde que dentro de certos limites de potência, visando atendimento das normas relacionadas qualidade do produto disponibilizado pelas concessionárias aos consumidores.

Além disso, evidenciou-se com os resultados obtidos pelas simulações que o ponto de conexão do gerador distribuído influencia no esquema de proteção da rede em questão, visto que dependendo do local de ocorrência da falta e do ponto de integração da GD, pode ou não ocorrer a atuação da proteção de forma a não romper nenhum requisito básico do sistema de proteção. Ademais, observou-se que a depender da localização da GD e do relé de sobrecorrente, pode ocorrer a atuação para uma falta reversa ao relé promovendo a atuação inadequada do mesmo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório Multiusuário de Geração Distribuída (LMGD) da UACSA/UFRPE e ao *Smart Grid Group* (SG2) da UFPB pelo suporte as atividades de pesquisa, bem como o amparo e auxílio financeiro da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

- A. Joseph and P. Balachandra, "Smart Grid to Energy Internet: A Systematic Review of Transitioning Electricity Systems," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 215787-215805, 2020.
- A. Muhtadi, D. Pandit, N. Nguyen and J. Mitra, "Distributed Energy Resources Based Microgrid: Review of Architecture, Control, and Reliability," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 57, no. 3, pp. 2223-2235, May-June 2021.
- B. Singh, and J. Sharma. "A review on distributed generation planning, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*", vol. 76, pp. 529-544, 2017.
- E. P. Madruga, D. P. Bernardon, R. P. Vieira, and L. L. Pfitscher, Analysis of transient stability in distribution systems with distributed generation, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 99, pp. 555-565, 2018.

- G. S. Chawda, A. G. Shaik, O. P. Mahela, S. Padmanaban and J. B. Holm-Nielsen, "Comprehensive Review of Distributed FACTS Control Algorithms for Power Quality Enhancement in Utility Grid With Renewable Energy Penetration," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 107614-107634, 2020.
- J. M. Filho, D. R. MAMEDE. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. Rio de Janeiro: LTC, 620 p., 2011.
- L. Mehigan, J.P. Deane, B.P.Ó. Gallachóir, and V. Bertsch, "A review of the role of distributed generation (DG) in future electricity systems", *Energy*, vol. 163, pp. 822-836, 2018.
- M. H. J. Bollen, J. Zhong, F. Zavoda, J. Meyer, A. McEachern, and F. C. López, "Power Quality aspects of Smart Grid", *International conference on renewable Energies and Power Quality (CREPQ'10)*, Granada, Spain, pp. 23-25, March, 2010.
- M. Hashmi, S. Hänninen, and K. Mäki, "Survey of Smart Grid Concepts, Architectures, and Technological Demonstrations Worldwide", *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America)*, *IEEE PES Conference*, 2011.
- N. Shang, Y. Ding e W. Cui, "Review of Market Power Assessment and Mitigation in Reshaping of Power Systems", no *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, pp. 1-18, 2021.
- N. Yadav, and D. K. Sambariya. *Mathematical Modelling and Simulation of Photovoltaic Module Using MATLAB/SIMULINK*. 9th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies, p. 1-6, 2018.
- Nascimento, J. P.; Brito, N. S. D.; Souza, B. A. "Proposition of an Adaptive Protection Scheme for Distribution Systems with Distributed Generation". *IEEE Latin America Transactions*, v. 16, n. 5, p. 1439-1444, 2018.
- P. Maji, and G. Ghosh. *Designing Over-Current Relay Logic in MATLAB*. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, p. 40-43, 2017.
- Priya, G. S.; Geethanjali, M. "Design and Development of Distance Protection Scheme for Wind Power Distributed Generation". 2018 *National Power Engineering Conference*, p. 1-6, 2018.
- R. Bayindir, I. Colak, G. Fulli, and K. Demirtas. "Smart grid technologies and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*", vol 66, pp. 499-516, 2016.
- S. Kakran, S. Chanana. "Smart operations of smart grids integrated with distributed generation: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, Part 1, pp. 524-535, 2018.
- Song, X.; Zhang, Y.; Zhang, S.; Song, S.; Ma, J.; Zhang, W. "Adaptive Protection Scheme for Distributed Systems with DG". *The Journal of Engineering*, v. 2017, n.13, p. 1432-1436, 2017.
- Y. M. Nsaif, M. S. H. Lipu, A. Ayob, Y. Yusof and A. Hussain, "Fault Detection and Protection Schemes for Distributed Generation Integrated to Distribution Network: Challenges and Suggestions," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 142693-142717, 2021.